

шлакового режимов, исследовать влияние различных входных факторов на выбор состава шихты заполнения и дутьевых параметров.

Список использованных источников

1. Чернобривец Б. Ф. Капорулин В. В., Завидонский В. А. Практика доменного производства. – М.: Металлургия, 1992. – 111 с.
2. Жембус М. Д., Монаршук А. П., Зуенок Г. А. Применение азота при раздувке доменных печей // Металлургическая и горнорудная промышленность. № 2, 1986. С. 7–9.
3. Улахович В. А., Можаренко Н. М. и др. Раздувка мощной доменной печи объемом 5500 // Сталь. № 1. 1988. С. 12–18.
4. Спирин Н. А., Лавров В. В., Рыболовлев В. Ю., Краснобаев А. В., Онорин О. П., Косаченко И. Е. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.
5. Щипанов К. А. Спирин Н. А., Онорин О. П. Математическая модель расчета задувочной шихты доменной печи с регулируемым процессом шлакообразования и восстановления // Известия вузов. Черная металлургия. № 6. 2006. С. 66–67.

УДК 669.042

Б. П. Юрьев*, В. А. Гольцев*, А. О. Еремин**

* ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

институт материаловедения и металлургии,

кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии», г. Екатеринбург, Россия,

** Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ШАХТНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА СИДЕРИТОВОЙ РУДЫ

Аннотация

На основе результатов промышленных исследований шахтных печей и расчетных данных оценено влияние вещественного состава исходной сидеритовой руды на показатели процессов обжига и обогащения. Показано, что при оценке качества исходной руды необходимо прежде всего учитывать содержание в ней монооксида железа, от окисления которого зависит приход теплоты в зону обжига и степень компенсации эндотермических эффектов реакций разложения карбонатов. Рассмотрены достоинства принципиально новой схемы охлаждения обожженной руды на реконструированной шахтной печи, которая за счет утилизации теплоты нагретого материала и передачи ее в зону обжига позволила снизить удельный расход топлива и повысить производительность печи. Рассмотрены мероприятия по повышению эффективности работы шахтных печей и последующего обогащения руды.

Ключевые слова: вещественный состав, сидеритовая руда, обжиг, охлаждение, шахтная печь, карбонаты, оксиды, утилизация, теплота, конструкция, параметры, окисление, разложение.

Abstract

Based on the results of shaft furnaces industrial research and calculated data estimated the influence of the material composition of the original siderite ore roasting on process performance and enrichment. It is shown that in assessing the quality of the original ore is first necessary to consider the content of iron monoxide, from oxidation of which depends on the arrival of the heat in the burning zone and the degree of compensation effects endothermic decomposition reactions of carbonates. The advantages of a fundamentally new roasted ore cooling scheme on the reconstructed furnace, which is due to the utilization of heat heated material and transfer it to the burning zone has reduced specific fuel consumption and improve productivity of the furnace. Measures to improve the efficiency of the shaft furnace and subsequent ore has been considered.

Keywords: material composition, siderite ore, roasting, cooling, shaft furnace, carbonates, oxides, recycling, heat, design parameters, oxidation, decomposition.

Сидеритовые руды подвергают обжигу с целью удаления из них диоксида углерода и с последующей магнитной сепарацией. С этой целью в 1972 году на обогащательной фабрике Бакальского рудоуправления была введена в эксплуатацию первая очередь фабрики высокотемпературного (950–1050 °С) окислительного обжига и магнитного обогащения кусковых сидеритовых руд в составе девяти шахтных печей проектной мощностью 750 тыс. т исходной руды в год. Продолжительный опыт эксплуатации шахтных печей первого блока подтвердил целесообразность проектирования второго блока шахтных печей производительностью 820 тыс. т исходной руды в год, который был запущен в эксплуатацию в январе 1980 года.

Режимы обжига и охлаждения обожженной сидеритовой руды значительно различаются на шахтных печах первого и второго блока. На печах первого блока (рис. 1) обожженная руда с температурой 800 °С поступает в бункера-охладители с помощью челноковых питателей. Здесь руда охлаждается с довольно высокой скоростью при перекрестном токе воздуха, который просасывается через жалюзийную решетку бункеров. Наличие существенной разницы температур по сечению кусков руды в этом случае приводит к возникновению термических напряжений, образованию трещин и к снижению механической прочности обожженного кускового материала. Температура материала на выходе из бункеров-охладителей была достаточно высокой (150–260 °С).

С целью снижения удельного расхода природного газа и температуры материала на выходе из бункеров-охладителей была произведена реконструкция шахтных печей второго блока (рис. 2): демонтированы челноковые питатели, что позволило увеличить высоту зоны охлаждения, а следовательно, степень завершения теплообменных процессов, в результате чего значительно снизилась (до 85 °С) температура материала на выходе из бункеров-охладителей. Проведенная реконструкция позволила объединить шахтную печь с бункером-охладителем. Появилась возможность утилизации физической теплоты обожженных материалов. Система охлаждения материала при этом полностью изменилась. В верхние короба бункера-охладителя повели вентиляторный воздух, а отвод охлаждающего воздуха выполни-

ли через нижние короба. Такая система охлаждения существенно отличала предложенную конструкцию от известных шахтных печей [1; 2], в которых воздух обычно подводится в нижнюю часть зоны охлаждения под давлением, что требует газоплотного устройства для выгрузки материала со шлюзовыми камерами. Материал по предложенному способу охлаждается в три стадии: в верхней части зоны охлаждения в режиме противотока до 250–300 °С, в средней части – в режиме прямотока до 150–200 °С, в нижней части зоны – до конечной температуры 60–85 °С в режиме противотока. Воздух для охлаждения подают в основание верхней подзоны охлаждения и делят на два потока в соотношении (1,5–2,0)/1. Первый из потоков направляли в верхнюю подзону охлаждения и далее в зону обжига, второй поток – в среднюю подзону охлаждения, после прохождения которой его смешивали с воздухом, подсасываемым в нижнюю подзону охлаждения, а затем удаляли из печи. Общий удельный расход воздуха на охлаждение уменьшился до 1600–2000 м³/т в отличие от 3000 м³/т, предусмотренных проектом.

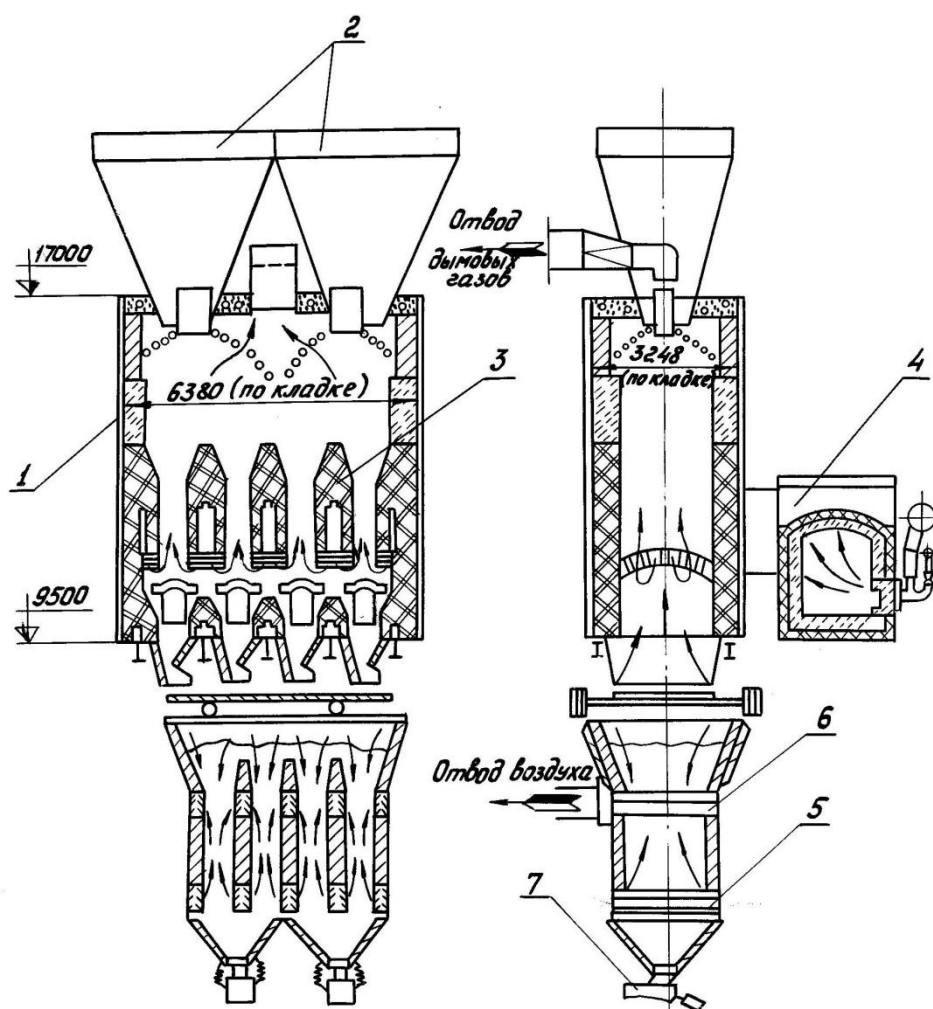


Рис. 1. Схема шахтной печи для обжига сидеритовой руды до реконструкции:

- 1 – шахта печи; 2 – загрузочные бункеры; 3 – керны для подвода дымовых газов; 4 – топка; 5 – коробы для подвода охлаждающего воздуха;
- 6 – коробы для отвода охлаждающего воздуха; 7 – разгрузочные вибротолки

Утилизация физической теплоты нагретого материала холодным воздухом, поступающим из бункеров-охладителей, и передача его в зону обжига позволили, с одной стороны, интенсифицировать процесс охлаждения руды, с другой – понизить расход природного газа на обжиг до $30 \text{ м}^3/\text{т}$ обожженной руды по сравнению с $47 \text{ м}^3/\text{т}$, предусмотренными проектом.

Внедрение указанных мероприятий обеспечило устойчивую работу печей второго блока тремя дымососами вместо работавших до реконструкции четырех дымососов. Изменение конструкции печи позволило значительно интенсифицировать протекание всех физико-химических процессов в зоне обжига. Ликвидация разгрузочных тележек увеличила на 20 % высоту охлаждаемого слоя обожженной руды. В результате температура материала на выходе из бункеров-охладителей понизилась в среднем по блоку до $80\text{--}85^\circ\text{C}$. Нагрев части охлаждающего воздуха в зоне обжига до температуры, близкой к температуре продуктов сгорания, исключил перекося температурного поля на горизонте их смешивания. Смена направления движения воздуха (противоток – прямоток – противоток) в зоне охлаждения привела к активному разрыхлению материала и интенсификации его охлаждения.

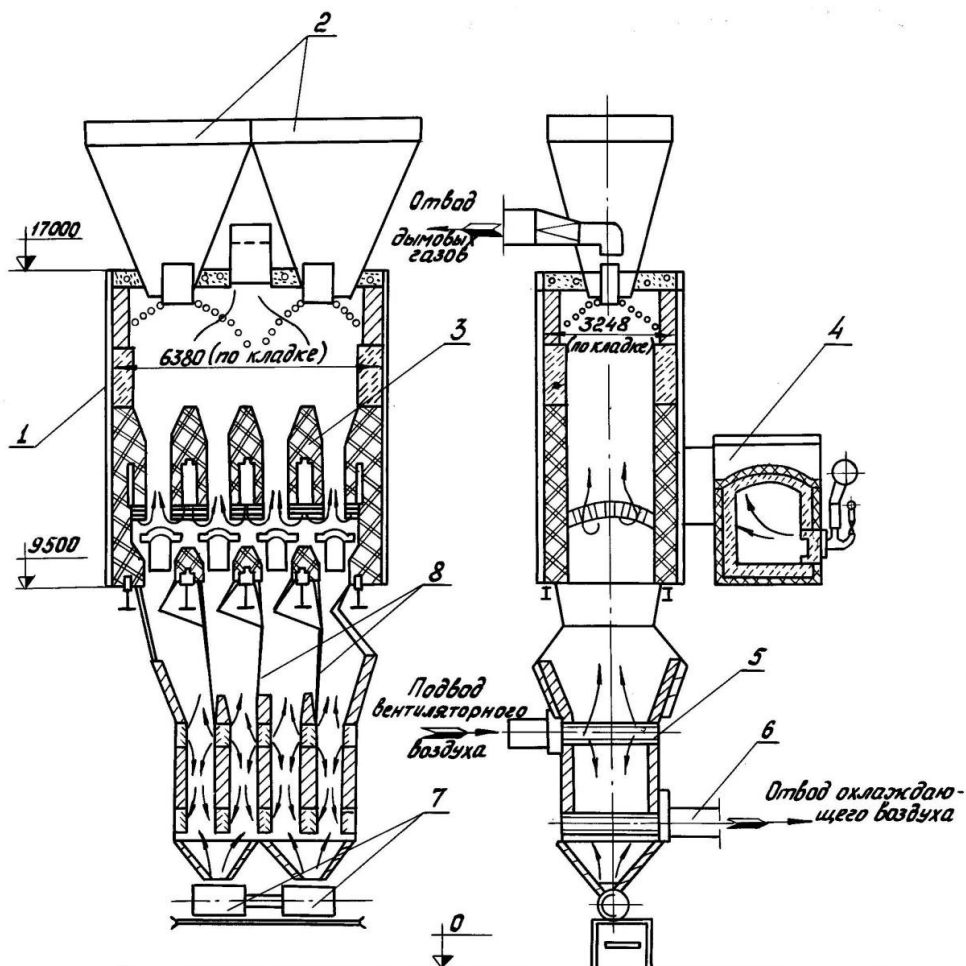
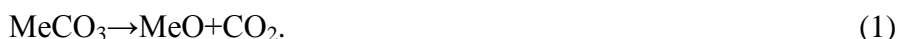


Рис. 2. Схема шахтной печи для обжига сидеритовой руды после реконструкции: 1 – шахта печи; 2 – загрузочные бункеры; 3 – керны для подвода дымовых газов; 4 – топка; 5 – коробки для подвода охлаждающего воздуха; 6 – коробки для отвода охлаждающего воздуха; 7 – барабанные питатели; 8 – перегородки

Наряду с конструктивными параметрами большое влияние на показатели работы шахтных печей оказывает вещественный состав исходной сидеритовой руды. Так, процентное содержание отдельных компонентов в руде изменяется в довольно широких пределах [3], %: FeO – от 19,98 до 40,55; Fe₂O₃ – от 1,14 до 13,98; MgO – от 10,65 до 25,42; CaO – от 0,24 до 11,02; SiO₂ – от 0,20 до 10,52; Al₂O₃ – от 1,18 до 8,30; ПМПП – от 31,38 до 41,76. Это можно объяснить условиями образования руд, глубиной залегания, составом вмещающих их пород и тем, что карбонатные сидеритовые руды сложены различными текстурно-минералогическими разновидностями. Среднегодовой химический состав исходной сидеритовой руды, поступающей за последние годы на обжиг-обоганительную фабрику, отличался сравнительной стабильностью (при некотором уменьшении содержания железа и увеличении содержания карбоната кальция). В отдельные периоды работы фабрики наблюдались значительные колебания по химическому составу сидеритовых руд.

Качество исходной руды, поступающей на обжиг, в значительной мере влияет на тепловую работу шахтных печей и показатели магнитного обогащения. При этом важно знать, как изменяется в руде содержание монооксида железа FeO. При повышенном содержании FeO выделяющейся теплоты от его окисления достаточно, чтобы скомпенсировать эндотермический эффект реакций разложения карбонатов. Работа шахтных печей на руде с пониженным содержанием FeO (даже при достаточно высоком содержании в руде железа) всегда связана с перерасходом топлива и довольно невысокими технико-экономическими показателями. Большое значение имеет при этом содержание карбонатов в руде. Ниже приведены результаты влияния вещественного состава исходной сидеритовой руды на показатели процессов обжига и обогащения.

Процесс обжига сидеритовой руды в шахтной печи сопровождается разложением карбонатов железа FeCO₃, магния MgCO₃, марганца MnCO₃, образующих изоморфную смесь, и карбоната кальция CaCO₃ по реакции:



Разложение карбонатов железа и марганца осложнено окислением низших оксидов этих элементов выделяющимся при разложении диоксидом углерода по стехиометрическим уравнениям



Реакции (2) и (3) являются обратимыми и, как следует из диаграммы равновесия, не могут дойти до конца в направлении образования оксидов Fe₃O₄ и Mn₃O₄. При обжиге руды в окислительной атмосфере происходит доокисление Fe₃O₄ и Mn₃O₄ кислородом воздуха до Fe₂O₃ и Mn₂O₃ и CO до CO₂.

Рассчитаем и сравним затраты теплоты на процесс декарбонизации бакальской сидеритовой руды различного химического состава. В табл. 1 представлены химические составы проб сидеритовой руды, на которых проводились в различные периоды балансовые испытания на шахтных печах. Химический состав проб сидеритовой руды, пересчитанный на содержание в них карбонатов, приведен в табл. 2. Используя свойство аддитивности теплот реакции и зная теплоты образования веществ, участвующих в реакции (табл. 3) [4], нетрудно найти тепловые эффекты реакций разложения карбонатов и окисления низших оксидов железа и марганца.

Таблица 1

Химический состав проб сидеритовой руды

Компонент	Содержание, %, в период испытаний				
	1	2	3	4	Среднее за четыре периода
Fe	33,17	30,70	31,66	28,27	30,25
FeO	39,10	37,70	36,50	34,00	36,40
Fe ₂ O ₃	3,97	2,00	4,70	2,65	2,80
CaO	2,00	3,60	2,15	6,10	3,43
SiO ₂	6,50	5,90	4,81	5,00	5,55
MgO	8,80	9,90	10,94	10,80	9,45
MnO	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Al ₂ O ₃	2,46	2,03	2,80	1,93	2,35
S	0,10	0,19	0,16	0,17	0,16
ПМПП	35,87	37,48	36,74	38,15	36,07

Таблица 2

Химический состав проб сидеритовой руды, пересчитанный на содержание в них карбонатов

Компонент	Содержание, %, в период испытаний				
	1	2	3	4	Среднее за четыре периода
FeCO ₃	63,05	60,80	58,68	54,83	58,70
Fe ₂ O ₃	3,97	2,00	4,70	2,65	2,80
CaCO ₃	3,57	6,43	3,84	10,89	6,12
SiO ₂	6,50	5,90	4,81	5,00	5,55
MgCO ₃	18,41	20,71	22,89	22,59	19,77
MnCO ₃	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94
Al ₂ O ₃	2,46	2,03	2,80	1,93	2,35
S	0,10	0,19	0,16	0,17	0,16

В табл. 4 представлены результаты расчетов расхода теплоты на процесс с учетом термодинамических превращений и эквивалентного расхода природного газа с поправкой на КПД печи, принятый равным 75 % в зависимости от химического состава руд.

Анализ представленных данных позволяет сделать ряд выводов. Расход природного газа и показатели процессов обжига и обогащения в значительной мере зависят от вещественного состава исходной руды. Так, при проведении балансовых испытаний в период 1 на обжиг поступала руда с высоким содержанием карбоната железа (39,1 % FeO) и пониженным содержанием карбонатов кальция (2,0 % CaO) и магния (8,8 % MgO). Суммарный тепловой эффект от реакций разложения и окисления оказался в этом случае положительным, и топливо требовалось только на компенсацию тепловых потерь с отходящими газами, материалом и через кладку печи. Этим объясняются и высокие показатели процессов обжига и обо-

гащения, полученные в этот период. В периоде 2 качество исходной руды существенно ниже. Содержание карбонатов кальция и магния в руде повысилось, а карбоната железа уменьшилось. Расход теплоты на проведение термохимических превращений составил 7,04 МДж на 100 кг исходной руды. Если пересчитать эту теплоту на эквивалентный расход природного газа ($Q_H^P = 35590 \text{ кДж/м}^3$), то во втором случае (период 2) дополнительный расход природного газа на процесс обжига по сравнению с балансовыми испытаниями в периоде 1 составил $3,67 \text{ м}^3/\text{т}$ обожженной руды, что соответствует 11,33 % от общего расхода газа на обжиг одной тонны руды. Однако за счет сокращения тепловых потерь после реконструкции шахтных печей удельный расход газа в периоде 2 был ниже на $3,1 \text{ м}^3/\text{т}$ обожженной руды по сравнению с испытаниями в периоде 1 (удельный расход газа в периоде 1 равнялся $35,5 \text{ м}^3/\text{т}$).

Таблица 3

Теплота образования различных химических соединений

Химическое соединение	Теплота образования ($-\Delta H_{298}$)	
	кДж/моль	МДж/кг
FeO	263,68	3,67
MnO	384,93	5,43
MgO	601,24	14,92
CaO	635,10	11,33
Fe ₃ O ₄	1117,4	4,83
Mn ₃ O ₄	1386,58	6,06
Fe ₂ O ₃	821,32	5,14
Mn ₂ O ₃	959,81	6,08
FeCO ₃	747,68	6,45
MnCO ₃	894,96	7,79
MgCO ₃	1096,21	13,00
CaCO ₃	1206,00	12,05
CO ₂	393,51	8,94
CO	110,50	3,95

Таблица 4

Расход теплоты на процесс декарбонизации сидеритовой руды различного химического состава с учетом реакций окисления

Период испытаний	Расход (–) и приход (+) теплоты, МДж на 100 кг исходной руды от процессов						
	разложения				окисления		Общий тепловой эффект
	FeCO ₃	MgCO ₃	CaCO ₃	MnCO ₃	FeO	MnO	
1	–49,25	–22,15	–6,33	–1,97	+80,00	+1,61	+1,91
2	–47,49	–24,92	–11,40	–11,97	+77,13	+1,61	–7,04
3	–45,98	–27,55	–6,81	–1,97	+74,68	+1,61	–6,02
4	–42,83	–27,18	–19,30	–1,97	+69,56	+1,61	–20,11

Примечание. Эквивалентный расход газа на 1 т обожженной руды составил 0,78; 2,89; 2,47; $8,23 \text{ м}^3$ для периодов 1, 2, 3 и 4, а реальный 35,50; 32,40; 31,50 и $30,00 \text{ м}^3$.

Качество продуктов обжига и обогащения оценивалось по показателям рудоразборки продуктов обжига:

Период испытаний	Концентрат	Выход продуктов, %		
		Пустая порода	Недообжиг	Бурый железняк
1	80,8	15,8	1,2	2,2
2	74,5	15,7	7,7	2,1
3	81,0	15,0	3,4	0,6
4	68,6	20,3	10,1	1,0

Следует обратить внимание на высокий расход теплоты на процесс декарбонизации (20,11 МДж на 100 кг руды) во время проведения испытаний в периоде 4. В этот период на обжиг поступала руда с повышенным содержанием карбоната кальция и пониженным содержанием карбоната железа. Расход природного газа составил в этом случае 8,24 м³/т обожженной руды, что соответствует 27,47 % от общего расхода газа. Этим объясняется и возрастание количества недообжига в готовом продукте по сравнению с испытаниями в периоде 3. В дальнейшем при улучшении качества исходной руды количество недообжига на контролируемой печи снизилось до 0,5 % при неизменных производительности печи и расходе газа.

Существенное влияние на процесс обжига оказывает содержание в сидеритовой руде карбоната кальция, который входит в состав минералов доломит-анкерит. Разложение этих минералов сопровождается не только высоким потреблением теплоты, но и происходит в высокотемпературной зоне шахтной печи при температурах 800–900 °С. Даже незначительное (на 1–3 %) повышение содержания карбоната кальция в исходной руде существенно снижает интенсивность и качество процесса обжига и ведет к ухудшению показателей магнитного обогащения.

Расчеты показывают, что при увеличении содержания FeO в исходной руде на 1 % расход природного газа снижается на 0,40 м³/т обожженной руды. Увеличение содержания CaO и MgO в руде на 1 % увеличивает расход природного газа соответственно на 1,75 и 1,40 м³/т. Таким образом, технико-экономические показатели работы шахтных печей существенно зависят от химического состава исходной руды, поступающей на обжиг. Дальнейшего сокращения расхода природного газа на обжиг и увеличения производительности шахтных печей можно добиться за счет предварительного обогащения исходной руды в тяжелых суспензиях при удалении минералов типа доломит-анкерит и сланцев, входящих в состав пустой породы.

Полученные данные по влиянию вещественного состава сидеритовой руды на технико-экономические показатели работы шахтных печей совместно с результатами промышленных исследований, проведенных на одной из реконструируемых шахтных печей, позволили составить тепловой баланс печи. Исходные данные для составления баланса следующие:

Производительность печи по обожженному продукту, т/ч	10
Расход природного газа на отопление, м ³ /ч	300
Расход колошникового газа на выходе из печи с учетом подсоса воздуха через загрузочные бункеры, м ³ /ч	17000
Температура колошникового газа, °С	200
Расход воздуха, подаваемого на охлаждение в шахтную печь, м ³ /ч	15000
Температура поступающего в печь воздуха, °С	5
Количество воздуха, отсасываемого из печи, с учетом расхода на аспирацию в районе выгрузки, м ³ /ч	17000
Температура воздуха на выходе из печи, °С	60
Коэффициент избытка воздуха на отопление, д. ед.	1,8
Температура дымовых газов, поступающих в печь, °С	1050
Расход дымовых газов, м ³ /ч	5850
Температура материала на выходе из печи, °С	70
Содержание влаги в исходной руде, %	1
Расход исходной руды на 1 т обожженной, т/т	1,46

Тепловой баланс печи представлен в табл. 5. Анализ статей теплового баланса показывает, что при работе печи на руде достаточно хорошего качества приход теплоты от реакций окисления почти полностью компенсирует расход теплоты на разложение карбонатов. В этом случае теплота от сгорания газа тратится в основном (91 %) на компенсацию тепловых потерь с уходящими газами, охлаждающим воздухом, обожженным продуктом и в окружающую среду. После проведения реконструкции потери теплоты с обожженным продуктом и охлаждающим воздухом существенно снизились и не превышали 6,68 %, что позволило сократить расход газа на контролируемой печи примерно на 25 %. Потери теплоты с колошниковым газом остались на прежнем уровне и составляют существенную величину 22,5 % от общего расхода теплоты.

Расчеты зональных тепловых балансов позволяют определить количество воздуха, поступающего из зоны охлаждения в зону обжига шахтной печи (5970 м³/ч). Учитывая, что количество дымовых газов, поступающих в печь, составляет 5850 м³/ч, а объем диоксида углерода, выделяющегося из руды и скорректированного на расход кислорода, поглощенного из дымовых газов при окислении оксидов железа и марганца, равен 1080 м³/ч, то количество воздуха, подсасываемого через загрузочные бункеры, составит: 17000–5970–5850–1080=4100 м³/ч.

Таблица 5

Тепловой баланс шахтной печи при окислительном обжиге сидеритовой руды

Статьи прихода теплоты	Количество теплоты			Статьи расхода теплоты	Количество теплоты		
	МВт	МДж на 1 т обожженной руды	%		МВт	МДж на 1 т обожженной руды	%
С дымовыми газами $\frac{5850}{3600} \cdot 1050 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}$	2,56	921,60	44,99	С колошниковым газом $\frac{17000}{3600} \cdot 200 \cdot 1,36 \cdot 10^{-3}$	1,28	460,80	22,50
От реакций окисления (табл. 4) $762,9 \cdot 1,46 \cdot \frac{10}{3600}$	3,09	1112,40	54,31	На разложение карбонатов (табл. 4) $823,1 \cdot 1,46 \cdot \frac{10}{3600}$	3,34	1202,40	58,70
С воздухом $\frac{15000 \cdot 300 \cdot 18,86}{3600} \cdot 5 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3}$	0,40	14,40	0,70	С охлаждающим воздухом $\frac{17000}{3600} \cdot 60 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3}$	0,37	133,20	6,50
Суммарный приход теплоты	5,69	2048,40	100	С обожженным продуктом $\frac{1000}{3600} \cdot 70 \cdot 0,65 \cdot 10^{-3}$	0,01	3,60	0,18
				На испарение внешней влаги $2637,81 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1,46 \cdot \frac{10}{3600}$	0,11	39,60	1,93
				Потери в окружающую среду и не- вязка теплового баланса	0,58	208,80	10,19
				Суммарный расход теплоты	5,69	2048,40	100

Расход колошникового газа без учета подсосов воздуха через бункеры составит в этом случае 12900 м³/ч, а температура 260 °С. Из расчета зональных тепловых балансов шахтной печи следует, что снизить температуру дымовых газов при заметном потреблении теплоты на эндотермические реакции в зоне обжига не удастся.

В случае ухудшения качества руды (например, в 4 периоде испытаний) и повышения производительности температуру колошникового газа следует увеличить, чтобы избежать недообжига.

При существенном улучшении качества руды, которого можно ожидать при ее обогащении в тяжелых средах, потери теплоты с колошниковым газом можно уменьшить на 10–15 %.

Изучение распределения температур по высоте зон подогрева и обжига шахтной печи показало, что уже на расстоянии 1 м ниже уровня засыпи температура в слое достигала 850...900 °С. В целом установлено, что высокотемпературная область занимает заметный объем (80 % объема зон подогрева и обжига), что благоприятно сказывается на показателях обжига и обогащения.

Выводы

Проведена оценка влияния вещественного состава исходной сидеритовой руды на показатели процессов обжига и обогащения. На основе анализа статей теплового баланса установлено, что при работе шахтной печи на руде достаточно хорошего качества приход теплоты от реакций окисления полностью компенсирует расход теплоты на разложение карбонатов.

На реконструированной шахтной печи внедрена новая схема охлаждения обожженной руды, которая позволила утилизировать теплоту нагретого материала потоком холодного воздуха, подаваемого на охлаждение, и передавать ее в зону обжига. Это привело к интенсификации всех физико-химических и теплообменных процессов, к снижению удельного расхода топлива и увеличению производительности шахтной печи. Рассмотрены мероприятия по повышению эффективности работы шахтной печи и снижению энергозатрат на термообработку сидеритовой руды.